

10.076.003
09.12.2003

Josephson tunnel element mfr. - using aperture mask technique and inert counter electrode**Patent Assignee:** SIEMENS AG**Inventors:** DAALMANS G; HOENIG H E**Patent Family**

Patent Number	Kind	Date	Application Number	Kind	Date	Week	Type
DE 3128982	A	19830210				198307	B
DE 3128982	C	19851212				198551	

Priority Applications (Number Kind Date): DE 3128982 A (19810722)**Patent Details**

Patent	Kind	Language	Page	Main IPC	Filing Notes
DE 3128982	A		23		

Abstract:

DE 3128982 A

Josephson tunnel element for logic and memory circuits is produced by depositing on a substrate the superconductive layer of a base electrode, a superconductive counter electrode with very little tension relaxation and at least as high a jump temp. as niobium, and a tunnel barrier layer between the electrode layers.

The electrodes are deposited in a vacuum technique by oblique vapour deposition, interrupted by applying the tunnel barrier. The aperture mask on the substrate has an aperture structure to suit the desired tunnel element.

Simple method of producing Josephson tunnel elements with small leakage currents.

5/14

Derwent World Patents Index

© 2003 Derwent Information Ltd. All rights reserved.

Dialog® File Number 351 Accession Number 3655045

(19) BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

(12) Offenlegungsschritt
(11) DE 3128982 A1

(51) Int. Cl. 3:

H01L39/24

H 01 L 27/18

G 11 C 11/44

H 03 K 19/195

(71) Anmelder:

Siemens AG, 1000 Berlin und 8000 München, DE

(72) Erfinder:

Daalmans, Gabriel M. Dipl.-Ing.; Hoenig, H. Eckhardt,
Dipl.-Phys. Dr., 8520 Erlangen, DE

DE 3128982 A1

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

(54) »Verfahren zur Herstellung mindestens eines Josephson-Tunnelementes«

Mit dem Verfahren soll mindestens ein Josephson-Tunnel-element herzustellen sein, das auf einem Substrat abgeschiedene supraleitende Schichten einer Basiselektrode und einer Gegenelektrode sowie eine Schicht einer Tunnelbarriere zwischen den Elektrodenschichten enthält. Bei dem Verfahren werden in einem ununterbrochenen Vakuumprozeß die Schichten der Elektroden mit Hilfe einer Maskentechnik durch schräges Aufdampfen aufgebracht und wird zwischendurch die Schicht der Tunnelbarriere ausgebildet. Gemäß der Erfindung wird auf dem Substrat (4) eine Lochmaske (12) mit vorbestimmter Dicke (1) mit einer dem zu erzeugenden Tunnelelement angepaßten Lochstruktur (18) angeordnet. Vorteilhaft wird für die Schicht (24) der Gegenelektrode ein Material vorgesehen, das bei seinem Auftreten auf die Schicht (22) der Tunnelbarriere mit deren Material praktisch nicht reagiert. Als Material für die Schicht (24) der Gegenelektrode kann insbesondere eine Molybdän-Rhenium-Legierung vorgesehen werden.
(31 28 982)

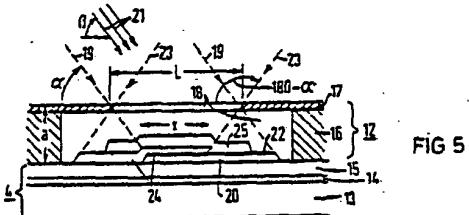


FIG 5

DE 3128982 A1

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung mindestens eines Josephson-Tunnelementes, insbesondere für Logik- und Speicher-schaltungen, das eine auf einem Substrat abgeschiedene supraleitende Schicht einer Basiselektrode, eine Schicht einer Gegenelektrode aus einem supraleitenden Material mit einer sehr geringen Spannungsrelaxation und mit einer mindestens so hohen Sprungtemperatur wie die von Niob sowie eine Schicht einer Tunnelbarriere zwischen den Elektrodenschichten enthält, bei welchem Verfahren in einem ununterbrochenen Vakuumprozeß die Schichten der Elektroden mit Hilfe einer Maskentechnik durch schräges Aufdampfen aufgebracht werden und zwischendurch die Schicht der Tunnelbarriere ausgebildet wird, d a - durch gekennzeichnet, daß auf dem Substrat (4) eine Lochmaske (12; 27; 37) vorbe-stimmter Dicke (a) mit einer dem zu erzeugenden Tunnel-element angepaßten Lochstruktur (18; 30, 31; 43) ange-ordnet wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, d a d u r c h g e - kennzeichnet, daß die Lochmaske aus einer auf dem Substrat (4) abzuscheidenden Sockelschicht (16; 28) und einer auf deren freier Flachseite aufzubrin-genden Deckschicht (17; 29) aufgebaut wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, d a d u r c h g e - kennzeichnet, daß für die Sockelschicht (16) und die Deckschicht (17) der Lochmaske (12) Poly-silizium bzw. Aluminium vorgesehen werden.
4. Verfahren nach Anspruch 2, d a d u r c h g e - kennzeichnet, daß für die Sock lschicht (28) und die Deckschicht (29) d r Lochmaske (27) Aluminium bzw. Polysilizium vorgesehen werd n.

22.07.01

2

-18- VPA 81 P 7542 DE

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4, da durch gekennzeichnet, daß in der Lochmaske (12; 27; 37) Löcher (18; 30, 31; 43) ausgebildet werden, deren Ausdehnung in der Sockelschicht 5. (16; 28) gegenüber der Ausdehnung in der Deckschicht (17; 29) stufenförmig vergrößert ist.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, da durch gekennzeichnet, daß die 10 Löcher (18; 30, 31; 43) in der Lochmaske (12; 27; 37) durch eine Fotolack-Maskentechnik und anschließende Ätztechnik ausgebildet werden.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, da durch gekennzeichnet, daß die 15 Lochmaske (12; 27; 37) nach Ausbildung der Schichten (20, 22, 24) des Tunnelementes wieder entfernt wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, da durch gekennzeichnet, daß für die 20 Schicht (24) der Gegenelektrode ein Material vorgesehen wird, das bei seinem Aufbringen auf die Schicht (22) der Tunnelbarriere mit deren Material praktisch nicht reagiert.
- 25 9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß als Material für die Schicht (24) der Gegenelektrode eine Molybdän-Rhenium-Legierung vorgesehen wird.
- 30 10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß eine Legierung mit einer Rhenium-Konzentration zwischen 10 Atom-% und 30 Atom-% vorgesehen wird.
- 35 11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, dadurch

~~-19-~~ VPA 81 P 7542 DE

gekennzeichnet, daß die beiden Komponenten der Legierung ratengeregelt aufgedampft werden.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11,
dadurch gekennzeichnet, daß die Schicht (22) der Tunnelbarriere durch Oxidation von Teilen der Oberflächenschicht der Basiselektrode (20) erzeugt wird.
- 10 13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Oxidation durch Beschuß mit Sauerstoffionen durchgeführt wird.
14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß den Sauerstoffionen Argon-Ionen beigemischt werden.
15. Verfahren zur Herstellung von mindestens zwei Josephson-Tunnelementen eines Interferometers nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß vor dem Aufbringen der Schicht für die Gegenelektroden die Schicht der Basiselektroden oder die Schicht der Tunnelbarrieren bis auf die Bereiche der auszubildenden Tunnelemente mit einer Isolationsschicht abgedeckt werden.
16. Verfahren zur Herstellung von mindestens zwei Josephson-Tunnelementen eines Interferometers nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß eine Lochmaske (45) mit mehreren sich kreuzenden, streifenförmigen Löchern (46 bis 48; 49, 50) vorgesehen wird und daß zwischen den Aufdampfschritten für die Schicht n (52, 53 und 55 bis 57) der Elektroden die Lochmaske (45) bezüglich einer Aufdampfungsquelle so verdreht wird, daß in den

U 120002
22.07.61

4

-20- VPA 81 P 7542 DE

Kreuzungsbereichen (59 bis 61) der Löcher (46 bis 48; 49, 50) die Tunnelemente entstehen.

SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT
Berlin und München

Unser Zeichen
VPA 81 P 7542 DE

5 Verfahren zur Herstellung mindestens eines Josephson-Tunnelementes

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Herstellung mindestens eines Josephson-Tunnelementes, insbesondere für Logik- und Speicherschaltungen, das eine auf einem Substrat abgeschiedene supraleitende Schicht einer Basiselektrode, eine Schicht einer Gegenelektrode aus einem supraleitenden Material mit einer sehr geringen Spannungsrelaxation und mit einer mindestens so hohen Sprungtemperatur wie die von Niob sowie eine Schicht einer Tunnelbarriere zwischen den Elektrodenschichten enthält, bei welchem Verfahren in einem ununterbrochenen Vakuumprozeß die Schichten der Elektroden mit Hilfe einer Maskentechnik durch schräges Aufdampfen aufgebracht werden und zwischen-durch die Schicht der Tunnelbarriere ausgebildet wird. Ein derartiges Verfahren ist aus der Veröffentlichung "SQUID '80 - Superconducting Quantum Interference Devices and their Applications", Berlin 1980, Seiten 399 bis 415 bekannt.

Von Josephson-Tunnelementen, die man insbesondere für hochintegrierte Logik- und Speicherschaltungen in beispielsweise 1- bis 2-Mikrometer-Technik vorsehen möchte, wird gefordert, daß ihre Kennlinien gegenüber Abkühl- und Aufwärmzyklen zwischen Raumtemperatur und Supraleitungstemperatur weitgehend stabil sind und daß ihre Leckströme bei Spannungen kleiner als die Summe der Energielücken der das Element bildenden supraleitenden Schichten möglichst klein sind.

Slm 2 Hag / 26.6.1981

22.07.81

6

-2- VPA 81 P 7542 DE

Mit dem aus der genannten Literaturstelle "SQUID '80" bekannten Verfahren lassen sich Josephson-Tunnellemente herstellen, welche die geforderte Stabilität gegenüber den erwähnten thermischen Zyklen aufweisen.

- 5 Dieses auch als Schwebemaskenverfahren bezeichnete Verfahren umfaßt im wesentlichen zwei Verfahrensschritte. Danach erfolgt zunächst die sogenannte Lithographie, d.h. die Herstellung einer Schattenmaske, und dann das eigentliche Aufdampfen der supraleitenden Schichten. Die Schwebemaske ist über einen einige zehntel ^{um} hohen Sockel fest mit einem Substrat verbunden, das hauptsächlich aus Silizium besteht. Sie ist so unterhöhl^t, daß freitragende, den geometrischen Formen der Schichten des herzustellenden
- 10 Josephson-Tunnelementes angepaßte Brücken ausgebildet sind. Mit Hilfe dieser Maskenstruktur werden dann in einer Hochvakuumanlage die Schichten des Tunnelementes aufgebracht bzw. ausgebildet. Dazu werden zwei als Basis- und Gegenelektrode dienende
- 15 Schichten aus supraleitendem Material unter verschiedenen Winkeln auf die Schwebemaske aufgedampft, und zwar so, daß sich die beiden Schichten unter der Brücke in vorbestimmter Weise überlappen. Als Material der Elektrodenschichten ist Niob vorgesehen,
- 20 das zum einen eine verhältnismäßig hohe Sprungtemperatur hat und zum anderen eine sehr geringe Spannungsrelaxation (vgl. z.B. DE-AS 21 63 250) aufweist. Zwischen den Aufdampfprozessen wird die erforderliche Tunnelbarriere durch Oxidation der freien Oberfläche
- 25 der als Basiselektrode dienenden ersten Niob-Schicht erzeugt. Auf diese Weise entsteht in der Überlappungszone der beiden Niob-Metallschichten das Tunnelement, ohne daß man die Vakuumbedingungen bei dessen Herstellung unterbrechen muß.
- 30

3128982

22.07.81

7

~~3~~ VPA 81 P 7542 DE

Es zeigt sich jedoch, daß die Leckströme von nach diesem bekannten Schwebemaskenverfahren hergestellten Josephson-Tunnelementen noch verhältnismäßig hoch sind. Ferner ist die Herstellung hochintegrierter Logikschaltungen mittels dieses Verfahrens erschwert, da die Stabilität der hierfür vorzusehenden Schwebemasken wegen ihrer Unterhöhlungen begrenzt ist. Dies bedingt eine entsprechende Begrenzung der Integrationsdichte an Josephson-Tunnelementen. Außerdem ist bei dem bekannten Verfahren die Oxidation der Basiselektrodenschichten zur Ausbildung der Tunnelbarrieren unter den Brücken der Maske verhältnismäßig schwierig auszuführen.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es deshalb, das bekannte Verfahren der eingangs genannten Art dahingehend zu verbessern, daß mit ihm die erwähnten Forderungen weitgehend zu erfüllen und die genannten Schwierigkeiten zu umgehen sind. Demnach sollen insbesondere mit dem Verfahren auch hochintegrierte Logikschaltungen mit Josephson-Tunnelementen auf verhältnismäßig einfache Weise zu erstellen sein, wobei die Tunnelemente jeweils verhältnismäßig kleine Leckströme aufweisen.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß auf dem Substrat eine Lochmaske vorbestimmter Dicke mit einer dem zu erzeugenden Tunnelement angepaßten Lochstruktur angeordnet wird.

Die Lochmasken-Lithographie bei dem Verfahren nach der Erfindung unterscheidet sich von der bekannten Schwebemasken-Lithographie im wesentlichen dadurch, daß ein Loch die Funktion der schwebenden Maskenteile übernimmt.

~~A~~ VPA 81 P 7542 DE

Die mit dem Verfahren nach der Erfindung verbundenen Vor-
teile sind dann insbesondere darin zu sehen, daß sich
mit der Verwendung der besonderen Lochmaske und des be-
sonderen Materials für die Gegenelektrode die Sauberkeit
5 bei der Herstellung der Schichten des Josephson-Tunnel-
elementes bedeutend erhöhen läßt. D.h., die Löcher der
Maske lassen sich besser reinigen als die unter Brücken
einer Schwebemaske liegenden Oberflächenteile. Außerdem
erfährt die Schicht der Tunnelbarriere keine wesentliche
10 Veränderung bei den ständig unter Hochvakuumbedingungen
durchzuführenden Verfahrensschritten; insbesondere tritt
keine Interdiffusion mit der sie abdeckenden Schicht der
Gegenelektrode auf. Derartige Veränderungen der Tunnel-
barriereschicht werden als eine Ursache für die Er-
höhung der Leckströme angesehen. Die Reproduzierbarkeit
15 sowie die Kennlinien der Tunnelemente werden also gegen-
über den bisher bekannten Elementen wesentlich verbessert.
Da außerdem die Tunnelbarrieren nicht unter Brücken wie
bei dem bekannten Schwebemaskenverfahren, sondern direkt
20 in den Löchern ausgebildet werden, ist ihre Herstellung
besonders einfach. Dabei können die Abstände zwischen be-
nachbarten Löchern sehr klein gehalten werden, so daß
eine hohe Integrationsdichte, d.h. eine große Anzahl von
Tunnelementen pro Flächeneinheit, zu erreichen ist. Das
25 Verfahren eignet sich deshalb besonders zur Herstellung
hochintegrierter Logikschaltungen.

Vorteilhafte Weiterbildungen des Verfahrens nach der Er-
findung gehen aus den Unteransprüchen hervor.

30

Zur weiteren Erläuterung der Erfindung und deren Ausbil-
dungen gemäß den Unteransprüchen wird auf die schema-
tische Zeichnung Bezug genommen, in deren Fig. 1, 2 und
3, 4 die bekannte Schwebemasken-Technik bzw. die Loch-
masken-Technik nach der Erfindung gegenübergestellt sind.
35 In Fig. 5 sind die wesentlichsten Schritte des Verfahrens

~~5~~ VPA 81 P 7542 DE

- nach der Erfindung in einem Querschnitt durch ein Josephson-Tunnelement mit Lochmaske angedeutet, die in Fig. 6 als Schrägansicht veranschaulicht ist. In den Fig. 7 und 8 ist ein weiteres Ausführungsbeispiel einer 5 derartigen Lochmaske in Schrägansicht bzw. als teilweise Querschnitt dargestellt. Fig. 9 zeigt als Schrägansicht die Herstellung der supraleitenden Elektroden- schichten eines Josephson-Tunnelementes, während aus den Fig. 10 und 11 eine besondere Ausführungsform einer 10 Lochmaske bzw. deren räumliche Anordnung bei dem Verfahren nach der Erfindung hervorgeht. Die Fig. 12 bis 14 zeigen als Aufsicht Einzelheiten eines erfindungsgemäß herzustellenden Interferometers.
- 15 Zur Herstellung eines Josephson-Tunnelementes werden gemäß der bekannten, in Fig. 1 als Querschnitt angedeuteten Schwebemasken-Technik durch schräges Aufdampfen zwei sich einander überlappende, supraleitende Metall- schichten 2 und 3 als Basis- bzw. Gegenelektrode auf 20 einem im allgemeinen aus mehreren Schichten aufgebauten Substrat 4 aufgebracht, wobei außerdem zumindest in der Überlappungszone dieser beiden Elektroden eine in der Figur nicht ausgeführte, als Tunnelbarriere dienende Schicht ausgebildet wird. Die geometrischen Formen der 25 Elektroden werden durch Öffnungen 5 und 6 und eine da- zwischen ausgebildete Brücke 7 einer sich in einem Ab- stand a' über dem Substrat 4 befindenden Schwebemaske 8 unter Berücksichtigung eines Aufdampfwinkels α' festge- legt. Diese in Fig. 2 auch als Aufsicht angedeutete 30 Schwebemaske 8 wird von einem auf dem Substrat 4 ange- ordneten Sockel 9 getragen, der im Bereich des zu er- stellen den Jos phson-Tunnel lement s, beispielsw ise durch Unt rätzen, ine ntsprechend Aussparung aufweist. Di seitliche Begrenzung di s r Aussparung ist mit 10 35 bezeichnet. Bei einer Länge L' und Breite B' der Brücke 7 kann dann bei dem Aufdampfwinkel α' bezüglich der Ebene der zu bedampfenden Substratoberfläche unter der Brücke

7 ein Josephson-Tunnelelement mit einer Fläche
 $F' = B' \cdot X' = B' \cdot (2a' \cotg \vartheta' - L')$ seiner Überlappungszone ausgebildet werden. Die Länge L' ist dabei kleiner als $2a' \cdot \cotg \vartheta'$.

- 5
- . In den Fig. 3 und 4 ist entsprechend den Fig. 1 und 2 die Lochmasken-Technik des Verfahrens nach der Erfindung angedeutet, wobei entsprechende Teile mit den gleichen Bezugssymbolen versehen sind. Gemäß dem Querschnitt der
 - 10 Fig. 3 soll ein Loch 11 einer auf dem Substrat 4 aufgebrachten Maske 12 eine Länge L und eine Breite B haben. Die Dicke der Lochmaske ist mit a bezeichnet. Bei einem Aufdampfwinkel ϑ ergibt sich dann eine Fläche der Überlappungszone des Josephson-Tunnelementes mit seinen
 - 15 beiden Elektroden 2 und 3 zu $F = B \cdot X = B \cdot (L - 2a \cotg \vartheta)$. Dabei ist die Länge L größer $2a \cdot \cotg \vartheta$.

- Als Beispiel soll der zur Herstellung von einer $1,5 \mu\text{m} \times 1,5 \mu\text{m}$ großen Überlappungszone eines Josephson-Tunnelementes mit etwa $1 \mu\text{m}$ langen Elektroden erforderliche Raumbedarf bei dem bekannten, in den Fig. 1 und 2 angedeuteten Verfahren mit dem Raumbedarf bei dem in den Fig. 3 und 4 angedeuteten Verfahren nach der Erfindung verglichen werden. Unter Zuhilfenahme der genannten Formeln lässt sich dann nachweisen, daß bei Anwendung einer bekannten $1,5 \mu\text{m}$ -Lithographie zur Erzeugung einer Schwebemaske etwa 3 mal so viel Platz benötigt wird wie bei Verwendung einer Lochmaske gemäß dem Verfahren nach der Erfindung. Hieraus ist ersichtlich,
- 20
- . 25 daß die Packungsdichte der Löcher und deshalb auch die der Tunnelemente sehr hoch gewählt sein kann, d.h., das Lochmasken-Verfahren ist insbesondere zur Herstellung von hochintegrierten Logikschaltungen geeignet.
 - 30
 - 35 Di Herstellung eines Josephson-Tunnelementes nach dem erfindungsgemäß n Verfahren umfaßt im wesentlichen zwei

12-07-01

m

-2- VPA 81 P 7542 DE

Verfahrensschritte, nämlich zunächst den Aufbau einer Lochmaske und daran anschließend die Ausbildung des Tunnelementes. Beide Verfahrensschritte sind in dem in Fig. 5 dargestellten Querschnitt schematisch ange-
5 deutet. Gemäß dem ersten Verfahrensschritt wird eine Lochmaske 12 auf einem Substrat 4 erstellt. Das Sub-
strat enthält einen scheiben- oder plattenförmigen Trä-
gerkörper 13, beispielsweise aus Silizium, auf dem eine
als Grundebene für eine Logikschaltung dienende Schicht
10 14 aus supraleitendem Material wie z.B. aus Niob mit
einer Dicke von wenigen 100 nm aufgedampft ist. Diese
Grundebene wird ihrerseits mit einer Isolierschicht 15
von wenigen 100 nm Dicke bedeckt. Diese beispielsweise
aus Si, SiO oder SiO₂ bestehende Schicht kann zweckmäßig
15 in einem Niedrigtemperaturverfahren abgeschieden werden,
bei dem die darunterliegende Niobschicht 14 nicht ange-
griffen wird. Die Isolierschicht isoliert das aufzubrin-
gende Schaltelement von der supraleitenden Grundebene 14
und dient zum Transport schneller Schaltsignale in Ge-
20 stalt des Dielektrikums von Streifenleitern, die aus der
Grundebene und supraleitenden Verbindungsleitungen des
Josephson-Elementes gebildet werden. Durch die Auswahl
eines geeigneten Materials der Isolierschicht kann diese
auch als Tiefenbegrenzung für eine nachfolgende Plasma-
25 ätzlithographie bei der Herstellung der Lochmaske 12 ver-
wendet werden. Diese Maske lässt sich dadurch ausbilden,
daß man zunächst einen Sockel 16, beispielsweise aus
Polysilizium, auf der Isolierschicht 15 des Substrats 4
mit einer Dicke von etwa 1 bis 3 µm aufbringt. Das Poly-
30 silizium kann beispielsweise mittels der sogenannten
C.V.D.-Technik bei etwa 700 K abgeschieden werden. Daran
anschließend kann gegebenenfalls eine Implantation von
P oder B und in Temvern bei etwa 1100 K vorgenommen wer-
den, um ein feinkörnige Polysiliziumschicht von geringer
35 Oberflächenrauhigkeit zu erzeugen. Auf den so erstellten

20.07.81

12

-8- VPA 81 P 7542 DE

Sockel 16 wird dann noch eine Deckschicht 17, beispielsweise aus Aluminium, mit einer Dicke zwischen 0,1 und 0,2 μ m aufgebracht. Anschließend wird in bekannter Weise diese Deckschicht 17 mit einem Fotolack bedeckt, 5 der durch eine Maske kontaktbelichtet wird, die auf dem Lack unmittelbar aufgebracht wird und eine den geometrischen Formen des herzustellenden Josephson-Tunnel- elementes angepaßte Lochstruktur hat. Nach dem Entwickeln der belichteten Teile des Fotolacks wird eine 10 Lochstruktur in der Lackschicht von gleicher Geometrie wie die Lochstruktur der Maske erhalten. In den Lacklöchern wird dann die Deckschicht 17 aus Aluminium beispielweise durch Plasmaätzen entfernt, so daß sich eine Lochstruktur mit der Länge L ergibt. Die verbleibenden 15 Lackschichten können danach in einem Trockenätzprozeß oder in einem Lösungsmittel ebenfalls entfernt werden. Anschließend wird das Material des Sockels im Loch der Deckschicht 17 mittels eines Trockenätzprozesses weggeätzt. Dabei wird vorteilhaft das in der Figur dargestellte Unterätzprofil erzeugt, d.h. die Länge der Lochstruktur in dem Sockel 16 ist größer als die Länge L des Loches in der Deckschicht 17. Durch dieses Unterätzen des unmittelbar an das Substrat angrenzenden Sockels läßt sich eine definierte Begrenzung der auf- 25 zbringenden Schichten des Tunnellementes erreichen. Außerdem wird ein späteres Entfernen der Lochmaske von dem Substrat erleichtert. Das Unterätzen kann man z.B. dadurch ermöglichen, daß man einen Sockel mit erhöhter Ätzrate unmittelbar am Substrat benutzt. Eine Erhöhung 30 der Ätzrate läßt sich beispielsweise dadurch erreichen, daß für den Sockel ein anderes Material als für die auf ihm aufgebrachte Deckschicht verwendet wird oder daß er gegenüber dem Material dieser Deckschicht unterschiedlich dotiert ist.

22.07.06

/3

~~✓~~ VPA 81 P 7542 DE

Die so auf dem Substrat 4 erhaltene Lochmaske 12 mit einer Lochstruktur 18 und einer Dicke a wird dann in einer Ultrahochvakuumanlage auf einen drehbaren, kühl- und aufheizbaren Halter montiert. Dieser Halter läßt sich so drehen, daß die Aufdampfrichtung des Materials für eine als Basiselektrode dienende Schicht, für die insbesondere Niob gewählt wird, mit der Ebene der zu bedampfenden Oberfläche des Substrates einen Winkel α bildet. Als weiterer Verfahrensschritt des Verfahrens nach der Erfindung wird dann bei einem Druck unter 10^{-9} Torr, wie in der Figur durch gepfeilte Linien 19 ange deutet ist, auf das Substrat 4 eine Schicht 20 aus dem Material der Basiselektrode mit einer Dicke von etwa etwa 100 nm aufgedampft, wobei das Substrat auf einer Temperatur zwischen etwa 70 K und 1000 K gehalten wird. Zur anschließenden Ausbildung einer Tunnelbarriereschicht durch Oxidation der Oberfläche der Schicht 20 der Basiselektrode durch Beschuß mit Sauerstoffionen wird der Halter bis zu einer Temperatur zwischen Raumtemperatur und etwa 70 K abgekühlt. Er wird dabei so ausgerichtet, daß die Substratoberfläche mit einer Ionenkanone einen Winkel β mit $d \leq \beta \leq 180 - \alpha$ bildet. Als in der Figur nicht dargestellte Ionenkanone wird zweckmäßig eine Ionenquelle gewählt, die eine hohe Strahlstromdichte und Homogenität des Strahls gewährleistet. Die Energie der erzeugten Ionen oder Atome soll dabei zwischen etwa 100 eV und 1500 eV einstellbar sein. Hierzu können in Abänderung der bekannten Ausführungsformen von Ionenquellen Beschleunigungsblenden für einen reduzierten Durchsatz verwendet werden, um einen größeren Druckgradienten zwischen Plasma und Aufdampfraum zu ermöglichen. Die Art der in der Figur durch gepfeilte Linien 21 dargestellten Teilchenstrahlen ist definiert durch das gewählte Gas oder Gasgemisch im Entladungsraum der Ionenquelle. Die Ionenkanone wird differenziell g pumpt. Durch einen

120-07-61

4

-40- VPA 81 P 75 4 2 DE

Sauerstoffionenstrahl, dem wahlweise Argonionen beige-mischt sein können, wird dann die aufgedampfte Niob-schicht 20 der Basiselektrode bei einem 10^{-6} Torr nicht überschreitenden Druck an ihrer Oberfläche

5 oxidiert, so daß sich auf ihr eine dünne, als Tunnel-barriere wirkende Oxidschicht 22 ausbildet. Der Druck bei der Oxidation wird z.B. durch geeignetes diffe-rentielles Pumpen der Ionenquelle eingestellt. Nach 10 Abschluß der Oxidation wird der Systemdruck in weniger als 20 sec wieder auf einen Druck von höchstens 10^{-9} Torr abgesenkt und dann der Halter mit dem Substrat so gedreht, daß die Bedampfungsrichtung für das Mate-rial einer Gegenelektrode mit der Bedampfungsebene einen Winkel 180° bildet. Bei dem genannten Druck 15 von höchstens 10^{-9} Torr wird dann, wie in der Figur durch gepfeilte Linien 23 angedeutet ist, eine als Gegenelektrode dienende Schicht 24 mit einer Schicht-dicke aufgedampft, die größer ist als die der als Basiselektrode dienenden Schicht 20.

20 Als Material der Gegenelektrodenschicht 24 wird vor-teilhaft ein supraleitendes Material gewählt, das zum einen eine Sprungtemperatur hat, die mindestens so hoch wie die des Materials der Schicht 20 der Basis-25 elektrode ist. Außerdem soll dieses Material mit dem Material der Schicht 22 der Tunnelbarriere bei seinem Aufbringen praktisch nicht reagieren. Darüber hinaus werden vorteilhaft als Materialien für die beiden Elektroden Materialien gewählt, die nur eine sehr 30 geringe Spannungsrelaxation zeigen (vgl. DE-AS 21 63 250). Unter diesen Bedingungen lassen sich dann Veränderungen der Tunnelbarrierenschicht 22, die mit einer Erhöhung der Leckströme und einer Veränderung des kritischen Stromes des herzustellenden Tunnel-35 elem ntes verbunden sind, weitgehend vermeiden.

10-07-01

15

- VPA 81 P 7542 DE

Schließlich wird das so erstellte Josephson-Tunnel-
element mit einer Länge X seiner Überlappungszone,
die $L - 2a \cdot \cot \vartheta$ beträgt, noch mit einer Isolier-
schicht 25, z.B. aus Siliziumoxid, versehen. Hierzu
5 kann entweder das bedampfte Substrat aus dem Vakuum-
raum der Bedampfungsanlage ausgebaut werden,
oder aber der Halter wird in der Anlage so gedreht,
daß der Bedampfungsstrahl bezüglich der zu bedampfenden
Substratebene unter einem Winkel von etwa 90° ver-
10 läuft.

Gegebenenfalls kann zuletzt noch die nicht mehr er-
forderliche Lochmaske 12 wieder entfernt werden. Wenn
der Sockel der Maske aus Silizium besteht, läßt sich
15 hierfür z.B. ein naßchemisches Verfahren mit einer
Pyrokatechol-Lösung einsetzen.

Falls erforderlich, können auf das so erstellte
Josephson-Tunnelement noch weitere Schichten, z.B.
20 zur Ausbildung von Steuerleitungen, aufgebracht wer-
den. Auf eine Darstellung dieser Schichten wurde in
Fig. 5 aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

In Fig. 6 ist in Schrägangsicht von oben die Lochmaske
25 12 nach Fig. 5 mit einer Deckschicht 17, z.B. aus
Aluminium, und einem unterätzten Sockel 16, z.B.
aus Polysilizium, veranschaulicht. Als Boden ist die
noch nicht mit den supraleitenden Schichten des
Josephson-Tunnelementes bedampfte Isolierschicht
30 15 aus SiO_2 des Substrates ersichtlich.

Eine weitere, für das Verfahren nach der Erfindung ver-
wendbare Lochmaske geht aus d r in Fig. 7 dargestellten
Schrägangsicht bzw. dem in Fig. 8 nur teilweise ausge-
35 führten Querschnitt hervor. Diese Lochmaske 27 mit

12- VPA 81 P 75 4 2 DE

einer Länge L und einer Breite B umfaßt einen im Gegensatz zu der Ausführungsform nach den Fig. 5 und 6 verhältnismäßig dünnen Sockel 28, beispielsweise aus Aluminium, der eine dickere Deckschicht 29, 5 insbesondere aus Polysilizium, trägt. Wie auch bei der Lochmaske gemäß den Fig. 5 und 6 vorgesehen ist, hat bei der Lochmaske 27 das Loch 30 des Sockels 28 eine größere Ausdehnung als das Loch 31 der auf ihm aufgebrachten Deckschicht 29. Das Loch 30 kann beispielsweise durch Unterätzen der Deckschicht vergrößert sein. Durch dieses Unterätzen des unmittelbar 10 an das Substrat angrenzenden Sockels 28 kann die Unterätztiefe beschränkt und die Stabilität der Lochmaske weitergehend verbessert werden.

15 Bei dem Verfahren nach der Erfindung ist es besonders vorteilhaft, wenn für das Material der Schicht der Gegenelektrode außer Niob eine Molybdän-Rhenium-Legierung verwendet wird. Insbesondere Legierungen mit 20 einer Rhenium-Konzentration zwischen 10 und 30 Atom-% sind besonders geeignet. Die Supraleitungs-Übergangstemperatur dieser Legierung ist vorteilhaft mindestens so hoch wie die des Niobs. Ferner sind auch Spannungsrelaxationsprozesse mindestens so stark behindert 25 wie in Niob-Schichten, da es sich um eine Legierung handelt, die zudem noch eine höhere Schmelztemperatur aufweist als Niob (vgl. DE-AS 21 63 250).

In Fig. 9 ist die Herstellung einer entsprechenden, 30 als Gegenelektrode dienenden Schicht aus dem 2-Stoff-System Molybdän-Rhenium näher veranschaulicht, wobei mit Fig. 5 übereinstimmende Teile mit den gleichen Bezugszeichen versehen sind. Die Legierung der Gegen- 35 elektrodenschicht 24 wird dabei durch ratengeregeltes Aufdampfen aus getrennten, durch das jeweilige Mate-

22.07.81

17

~~-13~~ VPA 81 P 7542 DE

- rial gekennzeichneten Quellen 33 und 34 unmittelbar auf der Schicht 20, 22 der Basiselektrode bzw. der Tunnelbarriere ausgebildet. Hierbei müssen die seitlichen Randzonen 35 und 36 aus jeweils nur einer
- 5 Komponente der Legierung am Rand der Deckschicht 24 durch besondere Formgebung der zu verwendenden Lochmaske 37 außerhalb des Bereichs 38 der Überlappungszone 38 von Grundschicht 20 der Basiselektrode und Deckschicht 24 der Gegenelektrode liegen. Zu diesem
- 10 Zweck können die Verdampfungsquellen 33 und 34 des 2-Stoff-Systems auf einer durch eine gestrichelte Linie 40 angedeuteten Geraden parallel zur Drehachse 41 der auf einem Substrat aufgebrachten Lochmaske angeordnet werden. Außerdem müssen die Abmessungen
- 15 der Lochmaske 37 quer zur Lochrichtung der Länge L ungleichmäßig sein, wobei die Lochabmessungen senkrecht zur Lochrichtung der Länge L entweder stetig oder, wie in der Figur als Alternative dargestellt, abgestuft zunehmen. In der Figur ist ferner noch die
- 20 Aufdampfungsquelle 42 für das beispielsweise Niob-Material der Basiselektronenschicht angedeutet.

Zu dem gleichen Zweck, nämlich der Vermeidung, daß Randzonen aus jeweils nur einer Komponente der Legierung der Deckschicht der Gegenelektrode in den Überlappungsbereich mit der Schicht der Basiselektrode zu liegen kommen, kann gemäß der Darstellung nach Fig. 10 die Lochmaske auch mit einem kreuzförmigen Loch 43 ausgeführt sein. Die Maske soll sich dabei

25 in der y-z-Ebene eines rechtwinkligen x-y-z-Koordinatensystems erstrecken. Gemäß Fig. 11 sind dann die Verdampfungsquellen 33 und 34 des 2-Stoff-Systems gemäß Fig. 9 in der von d n Einheitsvektor \hat{n} \hat{x} und \hat{y} aufgespannten Eb ne anzutragen. Der Winkel γ zwischen

30 35 der durch eine gepfeilte Linie b angedeuteten Auf-

22.07.81

18

-14- VPA 81 P 7542 DE

- dampfrichtung und der y-z-Ebene der Lochmaske muß dabei so auf die Lochtiefe der Maske abgestimmt sein, daß nur der in y-Richtung liegende Arm des kreuzförmigen Loches 43 bedampft wird. Durch Drehen 5 um 90° um die x-Achse können dann zwei orthogonale Schichten erzeugt werden, die sich einander als Basis- und Gegenelektrode auf dem Kreuzungspunkt überlappen.
- 10 Bei den Darstellungen gemäß den Fig. 3 bis 11 zur Erläuterung des Verfahrens nach der Erfindung wurde davon ausgegangen, daß mit diesem Verfahren in einem ununterbrochenen Vakuumprozeß die Elektrodenschichten und die Tunnelbarriereschicht nur eines einzigen
- 15 Josephson-Tunnelementes hergestellt werden sollen. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ist es jedoch in vorteilhafter Weise ebenso möglich, auch eine Vielzahl von solchen Elementen gleichzeitig zu erstellen.
- 20 So läßt sich beispielsweise mit der in Fig. 10 dargestellten Lochmaske mit kreuzförmigem Loch 43 ein Interferometer mit zwei Josephson-Tunnelementen herstellen. Hierzu dampft man zunächst eine Basiselektrodenbeschichtung in der beschriebenen Weise unter einem
- 25 vorbestimmten, ersten Aufdampfwinkel auf und oxidiert gegebenenfalls diese Schicht, um eine Tunnelbarriere zu erhalten. Anschließend wird jedoch statt des Aufdampfens der Gegenelektrodenbeschichtung unter einem vorbestimmten, zweiten Aufdampfwinkel eine Schicht aus
- 30 einem isolierenden Material unter diesem Winkel aufgebracht. Dann erst wird die Gegenelektrodenbeschichtung aufgedampft, wobei dieselbe Aufdampfrichtung gewählt wird wie für die Basiselektrodenbeschichtung. Es entstehen so zwei Josephson-Tunnelemente an den gegenüberliegenden
- 35 Enden eines der beiden sich rechtwinklig durchsetzenden

22-07-01

19

~~-15-~~ VPA 81 P 7542 DE

Schlitte des kreuzförmigen Loches 43 der Maske. Hierbei lassen sich zugleich auch die Anschlußleitungen an den beiden Josephson-Tunnelementen mit ausbilden. Bei dem beschriebenen Verfahren ist es prinzipiell möglich, die 5 Oxidation der Basiselektrode zu der Tunnelbarriere sowohl vor dem Aufbringen der zusätzlichen Isolierschicht als auch danach vorzunehmen.

- In den Fig. 12 bis 14 ist als Aufsicht eine weitere Ausbildungsmöglichkeit eines Interferometers angedeutet. 10 Dieses Interferometer soll beispielsweise drei Josephson-Tunnelemente aufweisen, die gemäß dem Verfahren nach der Erfindung gleichzeitig erstellt werden. Dementsprechend wird zunächst auf einem Substrat die in Fig. 12 15 teilweise ausgeführte Lochmaske 45 mit einer Lochstruktur aus drei parallelen, streifenförmigen Löchern 46, 47 und 48 sowie mit zwei diese Löcher senkrecht kreuzenden, streifenförmigen Löchern 49 und 50 ausgebildet. Anschließend wird das Material der Basiselektroden, bei- 20 spielsweise Niob, unter einem solchen Winkel aufgedampft, daß sich, wie aus Fig. 13 hervorgeht, lediglich in den Löchern 49 und 50 das Material abscheidet. Es entstehen so streifenförmige Schichten 52 und 53 auf dem Substrat. Nach Ausbildung der Tunnelbarriereschichten durch 25 Oxidation der Schichten 52 und 53 und nach Drehung der Lochmaske um 90° wird gemäß Fig. 14 im wesentlichen nur in den Löchern 46 bis 48 das Material der Gegenelektronen, beispielsweise Molybdän-Rhenium, aufgedampft, so daß dort streifenförmige Schichten 55 bis 57 entstehen. 30 Dabei ergeben sich in den mit 59 bis 61 gekennzeichneten Überlappungszonen der Schichten 52 und 53 mit den Schichten 55 bis 57 drei einzelne Josephson-Tunnellelemente und gleichzeitig die Struktur eines Interferometers.

22-07-01

40

-46- VPA 81 P 7542 DE

Anstelle der vorstehend beschriebenen Herstellung vollständiger Interferometerkreise kann man mit diesem Verfahren in einem Arbeitsgang auch Schaltelemente der so genannten direktgekoppelten Logik fertigen. Bei diesen

- 5 Elementen treten Widerstandsbahnen an die Stelle von supraleitenden Verbindungsleitungen zwischen Josephson-Tunnelementen.

- Bei den Ausführungsbeispielen des Verfahrens nach der
10 Erfindung wurde davon ausgegangen, daß die Schichten der Tunnelbarrieren durch eine bestimmte Oxidation der freien Oberflächen der Basiselekrodenschichten erzeugt wurden. Bei diesem Verfahren ist es jedoch ebensogut möglich, als Tunnelbarrieren Schichten aus anderen Materialien wie z.B. aus Siliziumoxid, Siliziumnitrid oder Siliziumcarbid zu verwenden. Diese Schichten werden in einem besonderen Aufdampfschritt auf den Basiselekrodenschichten abgeschieden.
- 20 Ein besonderer Vorteil des Verfahrens nach der Erfindung ist es, daß mit ihm außer der Herstellung einzelner Josephson-Tunnelemente oder Interferometer bei einer geeigneten Strukturierung einer Lochmaske auch die Josephson-Elemente oder Interferometer ganzer Logikschaltungen oder Teile solcher Schaltungen ohne Unterbrechung der Vakuumbedingungen gleichzeitig entsprechend den beschriebenen Verfahrensschritten erstellt werden können.
- 25

16 Patentansprüche

14 Figuren

-21-

Leerseite

3128982

Nummer: 3128982
Int. Cl. 3: H01L 39/24
Anmeldetag: 22. Juli 1981
Offenlegungstag: 10. Februar 1983

-23-
1/2

FIG 1

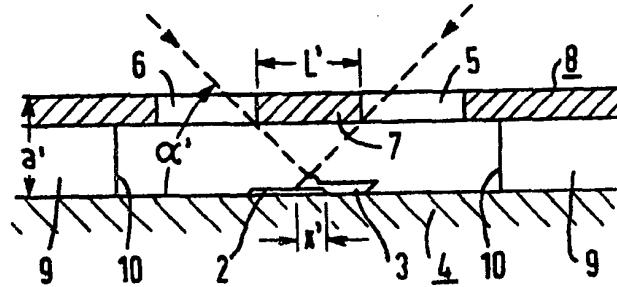


FIG 2

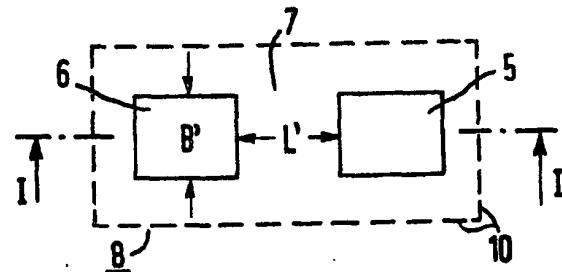


FIG 3

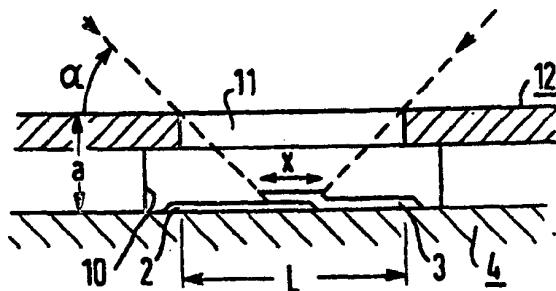


FIG 4

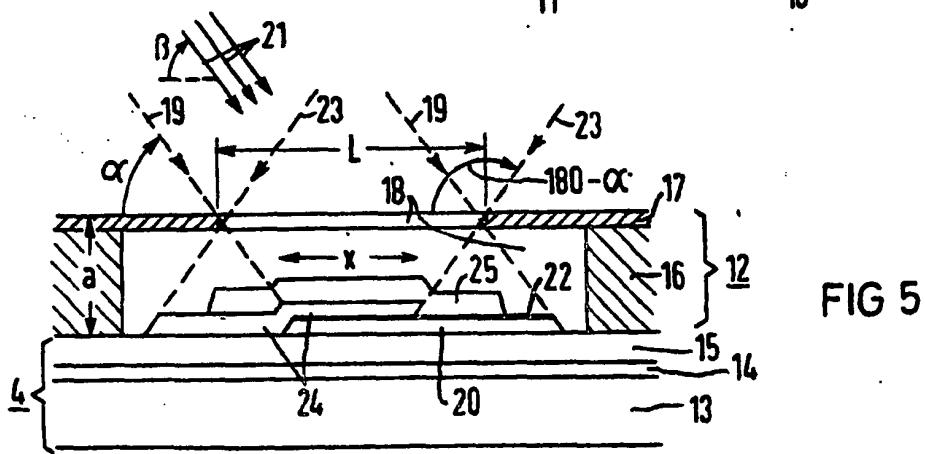
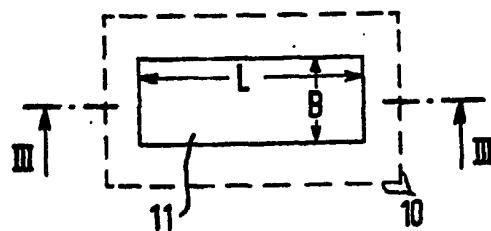


FIG 5

22.07.81
-22-

2/2

81 P 7542 DE

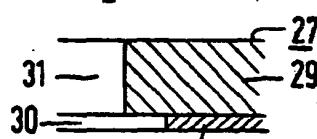
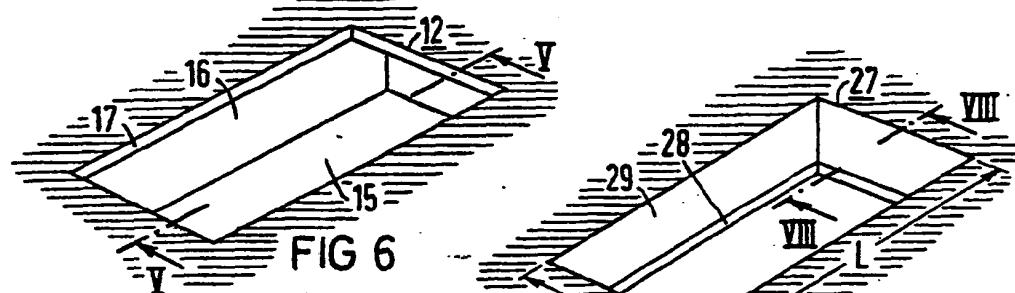


FIG 8

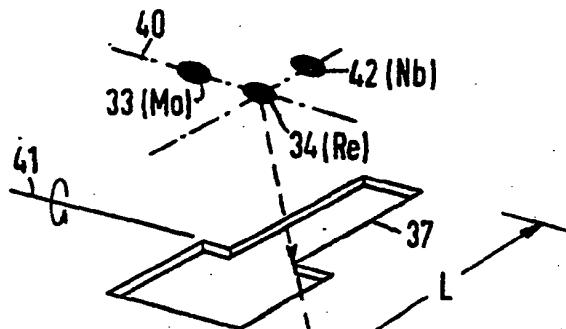


FIG 9

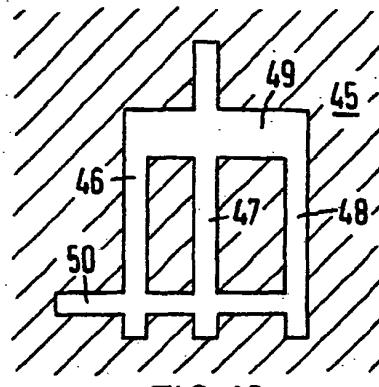


FIG 12

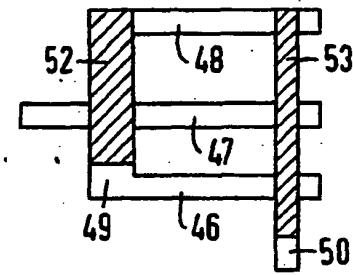


FIG 13

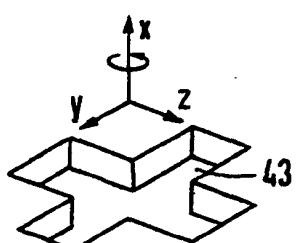


FIG 10

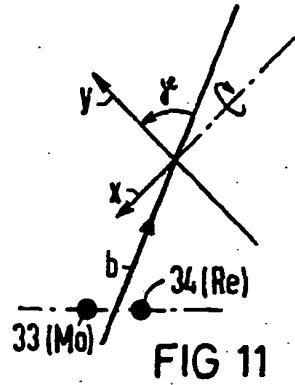


FIG 11

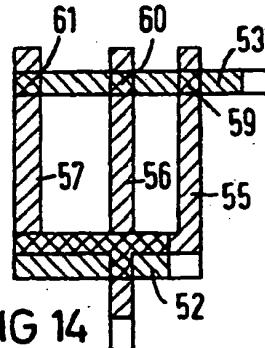


FIG 14